

水利水电工程施工导流系统优化设计与数值模拟分析

张妮

湖北水总水利水电建设股份有限公司 湖北武汉 430000

摘要：水利水电工程在建设过程中需要对施工区域进行有效的水流控制，以保证主体工程施工安全与施工环境稳定，施工导流系统因此成为工程施工组织中的关键环节。随着工程规模的不断扩大和施工技术的现代化发展，传统导流系统设计方法在适应性、预测性以及风险控制方面逐渐显现不足，而基于数值模拟的优化设计方法在流态分析、风险预判、结构优化等方面具备显著优势。本文围绕水利水电工程导流系统优化设计与数值模拟分析展开系统研究，从导流系统总体设计、流量控制方案、围堰结构布设、导流洞断面设计到溢洪能力评估等方面进行分析，并基于数值模拟技术对导流系统水力特性与结构稳定性进行验证。研究表明，科学的导流设计应在满足施工需求和防洪要求的基础上结合流域水文特征进行综合优化，而数值模拟技术能够显著提升设计精度，提高施工期安全保障能力。本文提出导流系统优化策略与数值模拟应用路径，为类似工程的施工导流设计提供参考依据。

关键词：水利水电工程；施工导流；优化设计；数值模拟；水力分析

引言

水利水电工程建设过程中，由于需要对河道进行截流、基坑开挖以及主体结构浇筑，必须构建科学合理的施工导流系统，以保证施工区域具有安全、稳定和干燥的作业环境。导流系统的设计水平直接影响施工安全、工程进度以及投资成本，因此成为工程策划阶段的重要内容。传统导流设计多依照经验公式、水文统计以及静态分析方法完成，虽然在常规工程中能够满足需求，但对于规模较大、地形复杂、水文条件动态变化明显的工程，其传统方法预测精度不足，往往导致设计偏保守或存在风险盲区。在现代工程背景下，数值模拟技术已逐步成为辅助导流设计的重要工具，通过建立河道三维模型或二维非恒定流模型，可实现对施工期流态、围堰稳定性、导流洞过流能力及水面线变化的动态模拟，有助于优化导流方案与施工组织设计。因此，本文从施工导流系统优化设计入手，结合数值模拟分析论证设计合理性，旨在为水利水电工程施工提供更具科学性、精细化与安全性的导流设计方法，为工程实践提供理论基础与技术参考。

作者简介：张妮（1990.06—），女，汉族，湖北仙桃，大学本科，中级工程师，研究方向：水利水电工程专业。

一、施工导流系统设计原则与总体构思

（一）导流规模确定的水文依据与安全标准设置

施工导流规模设计是导流系统的核心，其目的是保证施工期间河道过流能力充足、洪水风险可控、施工区域安全可靠。首先，在水文分析中需要对多年平均流量、设计洪水、特大洪水以及工期内可能发生的突发性极端水文事件进行综合评估，依据工程等别和施工风险等级选择相应的导流标准。一般而言，大型水利水电工程采用20年一遇或50年一遇洪水作为导流设计洪水，而枢纽级特大型工程甚至采用更高标准。其次，导流系统的安全标准不仅包括过流安全，还涉及围堰安全、基坑排水能力以及施工设备运行安全，因此在设计过程中需综合考虑洪水过程线、流速变化、河床冲淤与侧向侵蚀风险。最终，通过水文参数与工程安全系数综合确定导流系统的设计规模，使导流能力满足施工工期安全需求，并保证水位调控合理。

（二）导流方式选择与系统构型的综合评估

导流方式通常包括全段导流、分段导流、明渠导流、导流洞导流、围堰挡水导流等多种形式。不同河道条件和工程规模决定了导流方式的选择，一般基于水位控制要求、地形地质条件、投资成本及施工便利性进行综合评估。对于水量大、地形复杂的工程，可选择导流洞或多洞组合形式，以提升导流能力与施工灵活性；对于地势开阔的河段，可采用明渠导流以减少建设难度。

此外,围堰结构的形态应根据河道宽度、流速条件与河床材料选择土石围堰、钢板桩围堰或混凝土围堰,从而形成完整的导流系统构型。综合评估应从技术可行性、经济合理性、安全稳定性三方面展开,以确保导流系统整体协调。

(三) 导流系统与主体工程施工组织的协调性要求

施工导流系统必须与主体工程施工进度相匹配,并根据不同工期阶段实现导流能力的动态调整。导流布置应兼顾截流施工条件、基坑开挖顺序、主体结构浇筑计划及后期河道恢复。导流系统应在主体工程关键节点前完成建设,避免因导流能力不足影响工程进度。此外,在施工组织层面需要考虑导流洞后续是否承担发电或泄洪功能,以决定其永久或临时性质。科学的导流系统应形成“设计—施工—运行”全周期协调,使其在不同阶段均能保持功能高效,实现设计方案与施工计划的最优结合。

二、导流建筑物优化设计与水力性能提升路径

(一) 围堰结构优化与稳定性提升策略

围堰是导流系统的重要组成部分,其稳定性直接关系到施工期安全。围堰优化设计需从材料选择、断面布置、抗滑抗倾覆分析和防渗体系完善等方面展开。首先,在材料选择方面,应结合河床承载力与可利用工程材料,合理布置泥石围堰、混凝土围堰或钢板桩围堰,使其具有适应性强、成本可控的优势。其次,在断面布置中需依据流速、冲刷深度及水位差设置合理的堰顶高程、防渗墙深度与滤层厚度,以增强围堰整体稳定性。最后,围堰的抗滑抗倾覆稳定性应通过力学计算控制在规范要求范围内,同时在高风险区段布设反滤层和加固结构,并在施工期间实施实时监测,以确保动态安全。

(二) 导流洞断面设计与过流能力优化分析

导流洞作为导流系统中承担主要过流任务的结构,其断面设计直接影响水力性能与工程投资。首先,应根据设计洪水流量、洞身长度、洞轴线高程、出口水力条件等参数确定洞身断面形式,常见断面包括圆形、马蹄形与矩形。圆形断面抗压性能好,适用于高水头工程;马蹄形断面兼具过流能力与结构经济性;矩形断面施工方便但抗压性能相对较弱。其次,导流洞内水力损失计算需综合考虑入口收缩、洞身摩阻、局部水头损失以及出口消能方式,通过优化内壁粗糙度与局部形态可降低能量损失,提升过流效率。最终,应确保导流洞具备足

够的安全余量,避免极端水文条件下出现漫顶或洞身振动等风险。

(三) 明渠导流断面优化与水面线控制设计

在地形条件允许情况下,明渠导流是常用的导流方式。明渠断面优化应从流速控制、纵坡设计、边坡稳定与冲淤平衡等方面展开。首先,纵坡过大可能导致冲刷深度增加,而纵坡过小可能影响过流能力,因此需根据流量与地形确定合理纵坡。其次,边坡稳定可通过设置护坡及反滤层增强抗冲涌能力。在水面线控制方面,可采用均匀流与非均匀流计算方法,结合断面扩宽、底坡调整与优化曲线布设来实现水面线稳定控制,提高导流明渠的运行安全性。

三、导流系统数值模拟分析的模型建立与应用

(一) 水力学数值模型的建立基础与边界条件设定

在导流系统设计中,建立科学的数值模拟模型是分析水力特性的关键步骤。首先需要选用适用于河道流态模拟的数值模型,如二维浅水方程模型、三维数值水力模型或非恒定流模型,根据研究对象的复杂程度选择合适维度。模型建立需精确输入河床地形数据、糙率系数、水流边界条件及来水过程线,确保模拟结果具有可靠性。在边界条件设定中,应根据不同施工阶段的导流规模、控制水位与设计洪水过程进行设定,以便动态反映施工期实际条件,使模型更具有工程指导意义。

(二) 数值模拟在导流系统流态优化中的应用分析

数值模拟能够直观反映施工导流系统的流速分布、水流线形、水面线变化及局部涡流区情况,为优化设计提供依据。通过模拟分析,设计者能够发现导流洞入口处是否存在不均匀流态、围堰附近是否存在局部冲刷或回水区、明渠是否存在超流风险等问题,进而调整导流洞布置、渠底纵坡、围堰形态等设计参数,使导流系统的水力性能更加稳定。此外,通过对不同方案进行对比模拟,可以选择最优导流方式,实现施工安全性、过流能力与经济性之间的最优平衡。

(三) 围堰稳定性数值分析与风险预测应用

围堰在高水头或大流量工况下可能出现渗流破坏、边坡滑动或冲刷失稳风险,因此需要通过数值模拟进行稳定性分析。数值模拟可以建立围堰渗流场模型,通过压力分布、渗流量和潜在管涌路径分析围堰防渗体系的可靠性。在流固耦合模型中,可模拟水流冲击力对围堰结构产生的应力变化,预测围堰变形区域与潜在破坏点,为围堰加固设计提供依据。通过模拟分析可显著提高围

堰安全性评估的精度，为工程风险防控提供科学手段。

四、施工期导流风险分析与安全控制措施

(一) 极端水文事件对导流系统的影响与应急能力提升

在施工期间，极端洪水事件可能对导流系统产生超负荷影响，导致围堰溃决、水位超顶和基坑淹没等风险。因此需要在设计阶段实施极端事件模拟分析，对高流量、高水位情况下的导流系统响应进行评估。通过模拟可判断是否需要增加备用导流洞、临时加固围堰或提前调整施工计划。同时，应建立完备的应急预案体系，确保在紧急状况发生时能够迅速进行封堵、抢险和人员撤离，降低风险损失。

(二) 施工组织对导流系统安全的影响与协同控制

导流系统安全不仅与设计有关，还与施工组织密切相关，如围堰填筑质量不足、导流洞封堵不及时、施工机具阻水等都会影响导流安全。因此需要在施工组织中实施严格管理，设置监控系统实时监测水位变化、围堰沉降与渗流情况，并依据监测数据动态调整施工流程，使施工组织与导流系统运行保持协调性，避免因组织管理不当造成安全风险。

(三) 导流系统运行期监测技术与智能化管理路径

为确保导流系统全周期安全运行，应构建智能化监测系统，包括视频监控、水位监测、流速监测、渗流监测及结构监测等，通过在线平台实现实时数据采集与风险预警。智能监测系统可结合大数据分析和风险识别模型，提升预警的准确性和响应速度，使管理人员能够及时采取措施。未来，可进一步引入无人机巡查、物联网监测设备与智能算法融合技术，实现导流系统全生命周期的智慧化管理。

五、导流系统优化设计的发展趋势与技术创新方向

(一) 面向复杂工程的导流系统数字化设计集成发展

随着水利水电工程规模扩大和施工条件复杂度提升，单一的传统设计方法难以满足需求，未来导流系统设计将向数字化、平台化和集成化方向发展。通过构建数字孪生导流系统，可实现从方案设计、施工模拟到风险预测的全过程数字集成，使工程人员能够在虚拟环境中进行预演，提高设计与施工协同性。

(二) 多源数据驱动的导流安全智能分析技术创新

导流系统的安全管理逐渐向基于大数据的智能分析

方向发展，通过结合水文数据、监测数据、施工数据与地形数据，可采用机器学习模型进行风险预测、极端事件分析与安全预警，为导流系统优化提供数据支撑，使导流安全管理从被动应对转向主动预判。

(三) 绿色低碳理念推进导流系统可持续设计转型

在新时代生态文明建设的大背景下，水利水电工程导流系统的设计理念正从传统以安全与效率为核心，逐步转向绿色、低碳与可持续方向。导流方案不仅要满足施工期的功能需求，更应体现对生态环境的尊重与保护。绿色导流设计强调在围堰选材上优先使用可重复利用或环境友好型材料，减少资源浪费。在布设导流通道与围堰结构时，尽量降低对河床、岸线及水生态系统的扰动，避免对鱼类洄游、水生植物生长及水质自净能力造成长期负面影响。

结论

水利水电工程建设过程中，导流系统作为施工阶段的重要临时工程，其合理设计与高效运行直接关系到施工安全、工期控制与整体工程质量。针对不同流域的水文特性、地质地貌条件以及施工组织需求，应在充分调研与分析基础上，科学布置围堰，灵活选择导流方式，优化过流断面与水力构造物的结构参数，以实现导流系统的稳定性与经济性。数值模拟技术的发展为导流设计提供了更加直观、准确的决策工具，可用于模拟不同工况下的水力响应与结构安全性验证，提升设计的科学性与前瞻性。研究表明，借助数值模拟对导流方案进行全流程优化，不仅能够有效规避洪水威胁，还能降低工程施工的安全风险。面向未来，导流系统设计将更加注重数字化建模、智能化调控与生态环境保护，推动导流工程向高效、安全、绿色的方向持续演进，为水利水电建设高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王建华, 刘志强. 水利水电工程导流系统设计方法研究[J]. 水利水电技术, 2021.
- [2] 李国平, 张晓宁. 基于数值模拟的施工导流方案优化研究[J]. 水资源与水工程学报, 2022.
- [3] 陈立新. 大型水电站导流建筑物稳定性分析及优化[J]. 水电能源科学, 2020.